

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00097-а).

#### Литература

1. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Zhang G., Wu C. Quartz crystal microbalance studies on conformational change of polymer chains at interface. *Macromolecular Rapid Communications*. 2009. V. 30. N. 4—5. P. 328—335.
3. Patel R., Zhou R., Zinszer K., Josse F. Real-time detection of organic compounds in liquid environments using polymer-coated thickness shear mode quartz resonators // *Analyt. Chem.* 2000. V. 72. N. 20. P. 4888—4898.
4. Voinova M.V., Jonson M., Kasemo B. Missing mass' effect in biosensor's QCM applications // *Biosensors and Bioelectronics*. 2002. V. 17. P. 835—841.
5. Kanazawa K., Nam-Joon Cho. Quartz crystal microbalance as a sensor to characterize macromolecular assembly dynamics // *J. Sensors*. 2009. P. 1—17.
6. Gamby J., Lazerges M., Girault H.H., Deslouis C., Gabrielli C., Perrot H., Tribollet B. Electroacoustic polymer microchip as an alternative to quartz crystal microbalance for biosensor development // *Analyt. Chem.* 2008. V. 80. N. 23. P. 8900—8907.

7. McHalea G., Newton M. I. Surface roughness and interfacial slip boundary condition for quartz crystal microbalances // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 95. N. 1. P. 373—380.

8. Jouko Kankare, Kari Loikas, Mikko Salomäki. Method for measuring the losses and loading of a quartz crystal microbalance // *Analyt. Chem.* 2006. V. 78. P. 1875—1882.

9. Seok-Won Lee, Hinsberg W. D., Kanazawa K. K. Determination of the viscoelastic properties of polymer films using a compensated phase-locked oscillator circuit // *Analyt. Chem.* 2002. V. 74. N. 1. P. 125—131.

10. Rodahl M., Höök F., Kasemo B. QCM operation in liquids: an explanation of measured variations in frequency and Q factor with liquid conductivity // *Analyt. Chem.* 1996. V. 68. N. 13. P. 2219—2227.

11. Тимофеев Д. П. Кинетика адсорбции. М.: Изд-во АН СССР, 1962.

12. МЭК 60444-1:1986. Измерение параметров кварцевых резонаторов методом с нулевой фазой в  $\pi$ -образной схеме. Ч. 1. Основной метод измерения резонансной частоты и сопротивления кварцевых резонаторов методом с нулевой фазой и в  $\pi$ -образной схеме.

Дата принятия: 09.03.2016.

## МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

621.753.38

### Сличения эталонов-копий с государственным первичным эталоном единицы массы в 2014—2015 гг.

В. С. СНЕГОВ, Ю. И. КАМЕНСКИХ, И. В. ВИКТОРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,  
С.-Петербург, Россия, e-mail: V.S. Snegov@vniim.ru, Y.I. Kamenskih@vniim.ru,  
I.V. Viktorov@vniim.ru

Рассмотрены результаты сличений 2013—2014 гг. национального прототипа килограмма № 12 с Международным прототипом килограмма. Приведены результаты сличений 2015 г. вторичных эталонов-копий с Государственным первичным эталоном единицы массы ГЭТ 3—2008 с применением метода совокупных измерений. Проанализированы работы по совершенствованию государственного первичного эталона единицы массы, проводимые с учётом перехода на новое определение килограмма.

**Ключевые слова:** масса, килограмм, прототип, эталон, компаратор, вакуум, взвешивание, физические константы.

The results of the periodic comparisons of the national prototype of the kilogram number 12 against the international prototype of the kilogram were considered. The results of the comparisons of the secondary mass standards against the State primary standard by the method of the least squares are given. The analysis of works on the improvement of the State primary mass standard taking into account the transition to a new definition of the kilogram is specified.

**Key words:** mass, kilogram, the prototype, the standard, the comparator, vacuum, weighing, the physical constants.

В основе измерений массы в Российской Федерации лежит Государственный первичный эталон единицы массы ГЭТ 3—2008. С ростом технического прогресса эталон постоянно совершенствуется и в настоящее время представ-

ляет комплекс, состоящий из следующих средств измерений (СИ): национального прототипа килограмма (НПК) — физической копии № 12 Международного прототипа килограмма (МПК); эталона-свидетеля — физической копии № 26 МПК из

платиноиридиевого сплава; комплекта компараторов для передачи единицы массы вторичным эталонам.

В данном составе ГЭТ 3—2008 утверждён Приказом Росстандарта № 439 от 6 февраля 2009 г. Эталон обеспечивает передачу единицы массы рабочим СИ в диапазоне  $1 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^7$  кг с помощью вторичных и рабочих эталонов единицы массы в соответствии с государственной поверочной схемой [1]. Непосредственно ГЭТ 3—2008 передаёт единицу вторичным эталонам в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-6}$  до 20 кг.

Национальный прототип килограмма воспроизводит единицу массы по результатам сличений с МПК, хранящимся в Международном бюро мер и весов (МБМВ). Более 120 лет килограмм остаётся единственным из семи основных единиц величин Международной системы единиц, воспроизводящим единицу массы с помощью материального артефакта, принятого по соглашению. Несмотря на то, что МПК хранится с особой тщательностью и осторожностью, есть вероятность, хотя и небольшая, его неконтролируемого изменения и даже утраты. Учитывая, что многие другие единицы величин прямо или опосредованно в определениях прослеживаются к килограмму, Международный комитет по мерам и весам (МКМВ) принял резолюцию на 23-м заседании в 2007 г., призывающую МБМВ и национальные метрологические институты (НМИ) проводить работы по переопределению килограмма и ещё трёх основных единиц: ампера, кельвина и моля. Новое определение килограмма, основанное на фиксированном численном значении постоянной Планка  $h$ , будет, как ожидают, приниматься на очередной Генеральной конференции по мерам и весам в 2018 г.

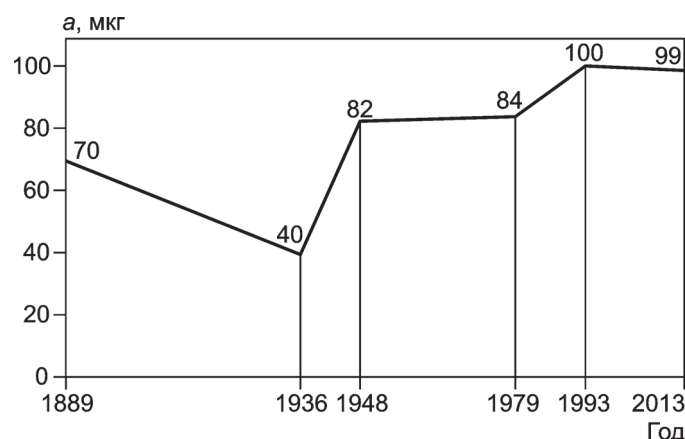
В 2013—2014 гг. проведены шестые сличения НПК № 12 с МПК. В 2014 г. сличения были завершены и НПК № 12 доставили обратно во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева с новым сертификатом калибровки. В результате получено новое значение массы  $1 \text{ кг} + 0,135 \text{ мг}$  с суммарной стандартной неопределённостью измерений  $0,007 \text{ мг}$ . В 2015 г. МБМВ сообщило о необходимости коррекции результатов сличений национальных прототипов, проведённых в период 2003—2013 гг. Для НПК № 12 коррекция составила  $\Delta m_{\text{МБМВ}} = -0,036 \text{ мг}$ , в результате чего его масса уменьшилась до  $1 \text{ кг} + 0,099 \text{ мг}$  с суммарной стандартной неопределённостью измерений  $0,003 \text{ мг}$ . Это вызвало необходимость введения соответствующей коррекции  $\Delta m_{\text{кор}}$  в полученные ранее результаты для всех российских вторичных эталонов в соответствии с формулой

$$\Delta m_{\text{кор}} = \Delta m_{\text{МБМВ}} m_{\text{ном}} / m_{12}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{ном}}$  — номинальная масса сличаемого эталона массы;  $m_{12}$  — номинальная масса НПК № 12.

Полученные результаты сличений показали, что нестабильность массы НПК № 12 за 20 лет составила  $v_{20}=0,001 \text{ мг}$  или за год  $v_1=0,00005 \text{ мг}$ . Результаты сличений национального прототипа за всю историю его применения приведены на рисунке.

После доставки НПК № 12 из МБМВ во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева были нача-



Сличения национального прототипа килограмма № 12 с Международным прототипом килограмма

ты сличения с ним эталона-свидетеля № 26 и эталонов-копий из нержавеющей стали. Перечень организаций-участников сличений приведён в табл. 1.

Перед сличениями поверхность НПК № 12 очищали согласно рекомендованной МБМВ методике [2], предусматривающей обработку смоченной в очищенном этиловом спирте замшевой салфеткой с последующей очисткой парами дважды дистиллированной воды. Гири из нержавеющей стали промывали гексаном, а затем высушивали на воздухе в условиях лаборатории.

Сличения эталонных гирь проводили методом совокупных измерений [3—5]. При этом методом замещения по шесть циклов взвешивания «АВВА» измеряли разности массы пар гирь в различных сочетаниях в соответствии со схемой сличений [6, 7]. Схема сличений приведена в табл. 2 в виде матрицы  $X(n \times k)$ , каждый столбец которой соответствует

Таблица 1

Участники сличений эталонов-копий 2015 г.

| Обозначение эталонной гири | Материал эталонной гири                  | Объём эталонной гири при 20 °С, см <sup>3</sup> | Организация-хранитель эталона       |
|----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| НПК № 12                   | Платино-иридиевый сплав (90% Pt 10 % Ir) | 46,4363                                         | ВНИИМ им. Д. И. Менделеева          |
| Эталон-свидетель № 26      | То же                                    | 46,4398                                         | То же                               |
| Ст № 5                     | Нержавеющая сталь                        | 124,150                                         | »                                   |
| Ст № 6                     | То же                                    | 126,935                                         | »                                   |
| Ст № 15                    | »                                        | 126,934                                         | »                                   |
| Ст № 2                     | »                                        | 126,484                                         | Росстандарт                         |
| Ст № 3                     | »                                        | 126,471                                         | То же                               |
| Ст № 8                     | »                                        | 126,928                                         | СНИИМ, Новосибирск                  |
| УкрСт                      | »                                        | 125,485                                         | ННЦ «Институт метрологии» (Украина) |
| БелСт                      | »                                        | 124,918                                         | БелГим (Республика Беларусь)        |

Таблица 2

Структурная матрица сличений эталонов-копий

| Номер сличения | Эталонная гиря |                       |        |        |         |        |        |        |       |       |
|----------------|----------------|-----------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|
|                | НПК № 12       | Эталон-свидетель № 26 | Ст № 5 | Ст № 6 | Ст № 15 | Ст № 2 | Ст № 3 | Ст № 8 | УкрСт | БелСт |
| 1              | 1              | -1                    | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 2              | 1              | 0                     | -1     | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 3              | 1              | 0                     | 0      | -1     | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 4              | 1              | 0                     | 0      | 0      | -1      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 5              | 1              | 0                     | 0      | 0      | 0       | -1     | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 6              | 1              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | -1     | 0      | 0     | 0     |
| 7              | 1              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | -1     | 0     | 0     |
| 8              | 1              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | -1    | 0     |
| 9              | 1              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | -1    |
| 10             | 0              | 1                     | -1     | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 11             | 0              | 0                     | 1      | -1     | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 12             | 0              | 0                     | 0      | 1      | -1      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 13             | 0              | 0                     | 0      | 0      | 1       | -1     | 0      | 0      | 0     | 0     |
| 14             | 0              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 1      | -1     | 0      | 0     | 0     |
| 15             | 0              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 1      | -1     | 0     | 0     |
| 16             | 0              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | 1      | -1    | 0     |
| 17             | 0              | 0                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | 1     | -1    |
| 18             | 0              | 1                     | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      | 0      | 0     | -1    |

Таблица 3

Первичные данные сличений

| Номер сличения $i$ | Разность массы $a_i$ , мг | СКО $S_i$ , мкг | Температура $t$ , °C | $\phi$ , % | Атмосферное давление, $H$ , гПа | Плотность воздуха $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\Delta V$ , м <sup>3</sup> | $u$ , мг |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------------|------------|---------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|----------|
| 1                  | -0,1178                   | 0,93            | 23,055               | 48,0       | 1011,61                         | 1,184188                                     | -0,0035                     | 0,1137   |
| 2                  | -93,638                   | 16,1            | 23,356               | 56,2       | 1016,69                         | 1,187778                                     | -77,713                     | 1,3088   |
| 3                  | -93,0077                  | 12,1            | 23,360               | 55,6       | 1019,68                         | 1,191358                                     | -80,499                     | -2,9184  |
| 4                  | -92,621                   | 20,1            | 23,116               | 52,6       | 1018,50                         | 1,191436                                     | -80,498                     | -3,3095  |
| 5                  | -91,9655                  | 7,2             | 23,374               | 59,5       | 1018,12                         | 1,188966                                     | -80,048                     | -3,2334  |
| 6                  | -91,9866                  | 12,3            | 23,438               | 56,2       | 1017,92                         | 1,188866                                     | -80,035                     | -3,1869  |
| 7                  | -92,1865                  | 14,1            | 23,297               | 58,9       | 1016,50                         | 1,18786                                      | -80,492                     | -3,4509  |
| 8                  | -93,055                   | 12,5            | 23,350               | 62,4       | 1016,02                         | 1,186113                                     | -79,049                     | -0,7325  |
| 9                  | -93,6178                  | 10,5            | 23,343               | 65,6       | 1015,44                         | 1,185176                                     | -78,482                     | 0,5742   |
| 10                 | -93,6278                  | 27,4            | 23,415               | 56,6       | 1018,28                         | 1,189347                                     | -77,710                     | 1,1805   |
| 11                 | 0,8808                    | 0,27            | 23,287               | 58,0       | 1017,42                         | 1,188722                                     | -2,7855                     | -4,1918  |
| 12                 | 0,3367                    | 0,76            | 23,251               | 57,2       | 1017,07                         | 1,188745                                     | 0,0010                      | -0,3354  |
| 13                 | 0,4459                    | 2,18            | 23,341               | 60,6       | 1013,50                         | 1,18355                                      | 0,4500                      | 0,0867   |
| 14                 | -0,0386                   | 1,53            | 23,281               | 58,4       | 1013,62                         | 1,184673                                     | 0,0130                      | 0,0540   |
| 15                 | -0,2861                   | 0,8             | 23,412               | 60,7       | 1013,35                         | 1,183036                                     | -0,4570                     | -0,2546  |
| 16                 | -0,9394                   | 1,28            | 23,560               | 48,0       | 1020,56                         | 1,192472                                     | 1,4430                      | 2,6600   |
| 17                 | -0,6427                   | 1,03            | 23,526               | 68,4       | 1015,90                         | 1,184537                                     | 0,5669                      | 1,3141   |
| 18                 | -93,4765                  | 19,3            | 23,398               | 68,7       | 1015,57                         | 1,184691                                     | -78,478                     | 0,4733   |

определённой эталонной гире. Здесь «1» и «-1» в  $i$ -й строке означают, что соответствующие гири участвуют в  $i$ -м сличении, «0» — гиря не участвует в данном сличении. Всего по этой схеме проведено  $n=18$  парных сличений для определения неизвестных масс эталонов-копий. Каждая строка соответствует разностному уравнению

$$y_i = -a_i + e_i \Delta V_i - h_i + \Delta m S_i, \quad (2)$$

где  $y_i$  — измеренная разность масс сличаемых гирь с учётом необходимых поправок;  $i = 1, \dots, 18$  — номер соответствующего сличения;  $a_i$  — измеренная на компараторе разность масс гирь, участвующих в соответствующем парном сличении;  $e_i$  — средняя плотность воздуха (из двух значений в начале и конце сличения), определяемая методом косвенных измерений по результатам прямых измерений атмосферного давления, температуры, влажности и массовой концентрации углекислого газа в окружающем воздухе с применением уравнения измерений, рекомендованным МБМВ [8, 9], молярная концентрация углекислого газа принималась равной

$$0,04 \text{ \%}; \quad \Delta V_i = \sum_{j=1}^k x_{ij} V_j \text{ — разность}$$

объёмов гирь, участвующих в  $i$ -м сличении ( $x_{ij}$  — элементы структурной матрицы сличений  $X$ , приведённой в табл. 2);  $h_i$  — поправка на неоднородность поля силы тяжести на разности высот центров тяжести сличаемых гирь;  $\Delta m S_i =$

$$= (\phi_i - 45) \sum_{j=1}^k x_{ij} \epsilon_j S_j \text{ — поправка на}$$

сорбцию влаги на поверхности сличаемых гирь в  $i$ -м разностном уравнении;  $\phi_i$  — относительная влажность воздуха в  $i$ -м разностном уравнении;  $S_j$  — площадь поверхности  $j$ -й сличаемой гири, равная 71,7 см<sup>2</sup> для гири из платиноиридиевого сплава и 147,8 см<sup>2</sup> для стальных гирь;  $\epsilon_j$  — удельная адсорбция паров воды на поверхности  $j$ -й гири, равная 0,006 мкг/см<sup>2</sup>·% для гирь из платиноиридиевого сплава и 0,007 мкг/см<sup>2</sup>·% — для стальных гирь (взяты по результатам исследований в лаборатории эталонов массы ВНИИМ им. Д. И. Менделеева по решению рабочей группы при МБМВ [10]).

В табл. 3 приведены измеренные на компараторе разности масс гирь «В-А», их среднее квадратическое отклонение (СКО), температура, влажность, атмосферное давление, плотность окружающего воздуха и разности объёмов сличаемых гирь в каждом разностном уравнении. Разность масс  $y_i$  сличаемых гирь вычислена по (2) с учётом необходимых поправок.

Таблица 4

Для нахождения масс сличаемых гирь был выбран обобщенный метод наименьших квадратов. Его применение требует вычисления ковариационной матрицы  $\mathbf{W}_y$  значений  $y_i$ . Рассмотрим неопределённости значений  $y_i$  в (2), являющихся суммой следующих составляющих:  $u(a_i)$  — неопределённость измеренной разности масс, равная СКО  $s_i$  (см. табл. 3), вклад в общую неопределённость  $u(y_i)$  равен  $s_i$ ;  $u(e_i) = u_e$  — неопределённость вычисления плотности воздуха даёт вклад в неопределённость  $u(y_i)$ , равный  $\Delta V_i u_e$ ,

$$\text{где } u_e = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ мг/см}^3; u(\Delta V_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^k x_{ij}^2 u^2(V_j)} —$$

неопределённость разности объёмов гирь при  $i$ -м парном сличении, вклад в общую неопределённость  $u(y_i)$  равен  $e_i u(\Delta V_i)$ ; неопределённость вычисления объёма эталона  $u(V_i)$  принимается 1,0; 0,5 мм<sup>3</sup> для стальной и платиноиридиевой гирь соответственно;

$u_d = d/\sqrt{6}$  — неопределённость, связанная с разрешающей способностью компаратора и равная 0,4 мкг.

При вычислении недиагональных элементов ковариационной матрицы учитывали ковариации, обусловленные плотностью воздуха в  $i$ -м и  $j$ -м сличениях, равные  $\Delta V_i \Delta V_j u_e^2$ , а также ковариации, обусловленные объёмом гирь в  $i$ -м и  $j$ -м сличениях, если участвует одна и та же гиря (её объём обозначен как  $V^*$ ), равные  $e_i e_j u^2(V^*)$ .

Вкладом неопределённостей от поправок на неоднородность поля силы тяжести и на сорбцию влаги на поверхности гирь можно пренебречь.

По 18 результатам измерений разности масс 10 сличаемых эталонов можно составить систему нормальных уравнений, которые в матричной форме имеют вид

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{Y}$  — вектор измеренных разностей;  $\mathbf{X}$  — матрица системы уравнений взвешивания (размерность 18×10) (см. табл. 2);

$\boldsymbol{\beta}$  — вектор искоемых значений масс сличаемых гирь.

Для того, чтобы система (3) имела решение, добавим девятнадцатое уравнение  $0,99 = x_1$ , которое соответствует отклонению массы НПК № 12 от номинального значения с суммарной стандартной неопределённостью  $u(m_{12}) = 3$  мкг.

Система (3) может быть решена обобщенным методом наименьших квадратов с ковари-

Результаты сличений эталонов

| Номер эталон-копии | Отклонение массы гири от номинального значения, мг | Расширенная неопределённость измерений ( $k = 2$ ), мг | Нестабильность относительно последнего сличения, мг |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| НПК № 26           | −0,0145                                            | 0,007                                                  | 0,0002                                              |
| Ст № 5             | −1,1353                                            | 0,023                                                  | −0,0006                                             |
| Ст № 6             | 3,0566                                             | 0,024                                                  | −0,0003                                             |
| Ст № 15            | 3,3925                                             | 0,024                                                  | −0,0003                                             |
| Ст № 2             | 3,3087                                             | 0,023                                                  | −0,0008                                             |
| Ст № 3             | 3,2551                                             | 0,023                                                  | −0,0010                                             |
| Ст № 8             | 3,5097                                             | 0,023                                                  | −0,0008                                             |
| УкрСт              | 0,8492                                             | 0,023                                                  | −0,0011                                             |
| БелСт              | −0,4651                                            | 0,023                                                  | —                                                   |

ационной матрицей  $\mathbf{W}_y$ , записанной по имеющимся неопределённостям и ковариациям для  $\mathbf{Y}$ .

Матрица  $\mathbf{W}_y$  имеет следующий вид. По диагонали указаны неопределённости  $y_{ii}$ , рассчитанные по (2):

$$w_{y(ii)} = s_i^2 + \Delta V_i^2 u_e^2 + e_i^2 u^2(\Delta V_i) + u_d^2,$$

где  $i = 1, \dots, 18$ . В последней строке диагонали указана стандартная неопределённость НПК № 12  $w_{y(19,19)} = u^2(m_{12})$ . Недиагональные элементы имеют вид

$$w_{y(i,19)} = w_{y(19,j)} = 0, i, j = 1, \dots, 18;$$

$$w_{y(ij)} = \Delta V_i \Delta V_j u_e^2 + e_i e_j u^2(V^*), \quad (4)$$

где  $i, j = 1, \dots, 18$  для  $i \neq j$ ; второе слагаемое в (4) может быть равно нулю, если в  $i$ -м и  $j$ -м сличениях участвуют разные гири.

Массы и их неопределённости оценивают по формулам [11]:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W}_y^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}_y^{-1} \mathbf{Y};$$

$$\text{cov}(\boldsymbol{\beta}) = (\mathbf{X}^T \mathbf{W}_y^{-1} \mathbf{X})^{-1}.$$

Таблица 5

Матрица корреляций значений масс эталонов

| Эталон-копии          | Эталон-копии |                       |        |        |         |        |        |        |       |       |
|-----------------------|--------------|-----------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|
|                       | НПК № 12     | Эталон-свидетель № 26 | Ст № 5 | Ст № 6 | Ст № 15 | Ст № 2 | Ст № 3 | Ст № 8 | УкрСт | БелСт |
| НПК № 12              | 1            | 0,92                  | 0,26   | 0,25   | 0,25    | 0,26   | 0,26   | 0,26   | 0,26  | 0,26  |
| Эталон-свидетель № 26 | 0,92         | 1                     | 0,25   | 0,24   | 0,24    | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,25  | 0,25  |
| Ст № 5                | 0,26         | 0,25                  | 1      | 0,99   | 0,99    | 0,97   | 0,96   | 0,96   | 0,95  | 0,95  |
| Ст № 6                | 0,25         | 0,24                  | 0,99   | 1      | 0,99    | 0,97   | 0,96   | 0,96   | 0,95  | 0,95  |
| Ст № 15               | 0,25         | 0,24                  | 0,99   | 0,99   | 1       | 0,97   | 0,96   | 0,96   | 0,96  | 0,95  |
| Ст № 2                | 0,26         | 0,25                  | 0,97   | 0,97   | 0,97    | 1      | 0,98   | 0,98   | 0,97  | 0,97  |
| Ст № 3                | 0,26         | 0,25                  | 0,96   | 0,96   | 0,96    | 0,98   | 1      | 0,99   | 0,98  | 0,98  |
| Ст № 8                | 0,26         | 0,25                  | 0,96   | 0,96   | 0,96    | 0,98   | 0,99   | 1      | 0,98  | 0,98  |
| УкрСт                 | 0,26         | 0,25                  | 0,95   | 0,95   | 0,96    | 0,97   | 0,98   | 0,98   | 1     | 0,98  |
| БелСт                 | 0,26         | 0,25                  | 0,95   | 0,95   | 0,95    | 0,97   | 0,98   | 0,98   | 0,98  | 1     |

Результаты сличений эталонов-копий приведены в табл. 4. Соответствующая корреляционная матрица значений представлена в табл. 5.

Следует отметить высокую корреляцию между значениями массы гири из платиноиридиевого сплава, высокую корреляцию между значениями массы стальных гирь, низкую корреляцию между значениями массы гирь из разных материалов.

Из-за различия плотностей исходной эталонной гири из платиноиридиевого сплава (PtIr) и сличаемых эталонных гирь из нержавеющей стали стандартная неопределённость копии № 26 в 3 раза меньше, чем для эталонных гирь из нержавеющей стали. Это в очередной раз показывает, что основным влияющим фактором на точность сличений вторичных эталонов из нержавеющей стали является аэростатическая архимедова сила. Преодолеть это возможно посредством перехода на вакуумное взвешивание при сличениях вторичных эталонов единицы массы из материалов различной плотности, включая артефакты из кремния. В рамках совершенствования ГЭТ 3—2008 в конце 2015 г. принято решение о закупке и включении в его состав вакуумного компаратора массы на максимальную нагрузку 1 кг фирмы «Сарториус» (Sartorius, Германия). Вакуумный компаратор позволит: проводить сличения килограммовых гирь в вакууме при давлении около  $1 \cdot 10^{-4}$  Па и в инертных газах с относительной стандартной неопределённостью около  $5 \cdot 10^{-11}$ ; повысить в несколько раз точность измерений плотности воздуха и чистых газов с помощью реализации прямого метода измерений на основе применения артефактов плавучести [10, 12]; проводить исследования поверхностных явлений на поверхности артефактов сорбции, изготовленных из различных материалов, при переходе от вакуума к условиям атмосферного воздуха [8, 9]; принимать участие в международных сличениях национальных эталонов с новым килограммом, воспроизводимым на основе постоянной Планка.

Переход только на вакуумное взвешивание, не считая перехода на новое определение килограмма, приводит к рекордному повышению точности взвешивания (до 50 нг на килограмм). Как известно из истории науки повышение точности измерений не один раз приводило к крупным открытиям. Например, повышение точности измерений плотности воды привело в 1932 г. к открытию дейтерия — одному из основных составляющих современного ядерного топлива [13].

**Заключение.** Сличения НПК № 12 в МБМВ в 2013—2014 гг. показали его высокую долговременную стабильность: со времени предыдущих сличений в 1993 г., т. е. за 20 лет масса НПК № 12 уменьшилась на 1 мкг при стандартной суммарной неопределённости измерений 3 мкг. Это даёт возможность его дальнейшего применения в течение 8—10 лет до создания в России первичного эталона единицы массы в соответствии с новым определением килограмма.

Согласно стратегии Консультативного комитета МБМВ (CCM WG Strategy 14.01.2013) весьма вероятно, что в 2018 г. на Генеральной конференции МБМВ будет принято новое определение килограмма. Независимо от его основы на эксперименте с ватт-весами или проекте «Авогадро» оно будет связано с воспроизведением килограмма в условиях ва-

куума. Внедряемая в государственном первичном эталоне единицы массы технология вакуумного взвешивания в переходный период обеспечит прослеживаемость к единице массы, воспроизводимой в МБМВ и НМИ, уже создавших эталоны на основе новых определений. Тем самым будет поддерживаться единство измерений на международном уровне. Передача единицы массы вторичным эталонам в условиях вакуума и дальнейшая передача эталонам более низкой точности и СИ в условиях окружающего воздуха позволят сохранить сложившуюся систему обеспечения единства измерений. С этой целью принято решение об оснащении ГЭТ 3—2008 вакуумным компаратором массы с наибольшим пределом измерений 1 кг и дискретностью отсчёта 0,1 мкг.

Учитывая значимость единицы массы как основной в системе СИ, а также фундаментальный характер исследований, работы по реализации нового определения килограмма на основе постоянных Планка и Авогадро, выполняющиеся в РФ, должны иметь продолжение.

## Литература

1. **ГОСТ 8.021—2015.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массы.
2. **Girard G.** The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988—1992) // *Metrologia*. 1994. N. 31. P. 317—336.
3. **Фридман А. Э.** Основы метрологии. Современный курс. СПб.: НПО «Профессионал», 2008.
4. **International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM).** Ed. 3<sup>rd</sup> Final draft 2007—05-18, JCGM CIPM, 2007.
5. **Шишкин И. Ф.** Теоретическая метрология. М.: Издательство стандартов, 1991.
6. **ГОСТ OIML R 111-1—2009.** Гири классов  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $M_1$ ,  $M_{1-2}$ ,  $M_2$ ,  $M_{2-3}$  и  $M_3$ . Часть 1. Метрологические и технические требования.
7. **Kochsiek M., Gläser M.** Comprehensive Mass Metrology. WILEY-VCH: 2000.
8. **Gläser M., Schwartz R., Mecke M.** Experimental Determination of Air Density Using a 1 kg Mass Comparator in Vacuum // *Metrologia*. 1991. N. 28. P. 45—50.
9. **Gläser M., Borys M.** Precision Mass Measurements // *Rep. Prog. Phys.* 2009. N. 72. P. 126101-1—126101-32.
10. **Kuzmin V. J., Snegov V. S., Shchelkin A. P.** A correction of a mass standard for the influence of humidity/Document CCM/88-10.
11. **Bich W.** Variances, Covariances and Restraints in Mass Metrology // *Metrologia*. 1990. N. 27. P. 111—116.
12. **Смирнова Н. А., Мошкова М. Н., Снегов В. С., Тютикова М. И.** Сличения эталонов-копий с государственным эталоном килограмма СССР в 1968—1969 гг. // Труды ВНИИМ. М.: Стандартгиз, 1970.
13. **Mizushima S., Ueki M., Nezu Y., Ooiwa A.** Performance of the new prototype balance of the NRLM. IMEKO 2000.

Дата принятия: 22.06.2016.